

УДК. 621.565

А.Е. Лагутин, П.Ф. Стоянов

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

ОЦЕНКА ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ С ПОПЕРЕЧНЫМИ РЕБРАМИ

В настоящей работе, используя физические модели ребристых элементов без учета влияния трубных участков, проведена оценка температурного поля ребер, и изменения температуры охлаждающего потока воздуха в межреберной полости. Определены также действительные температурные напоры между локальными значениями температур воздуха и поверхности ребер и оценено влияние смещения трубы по ребру на его тепловые показатели.

Ключевые слова: Эксперимент – Ребро – Труба – Температурное поле – Теплопередача

А.Ю. Лагутін, П.Ф. Стоянов

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

ОЦІНКА ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ З ПОПЕРЕЧНИМИ РЕБРАМИ

У цій статті, використовуючи фізичні моделі ребристих елементів без урахування впливу трубних ділянок, проведена оцінка температурного поля ребер та зміна температури потоку повітря, що охолоджує, у міжреберному каналі. Визначені також дійсні температурні напори між локальними значеннями температур повітря і поверхні ребер, оцінено вплив зміщення труби по ребру на його теплові показники.

Ключові слова: Експеримент – Ребро – Труба – Температурне поле – Теплопередача

DOI: 10.15673/0453-8307.1/2015.36779



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. ВВЕДЕНИЕ

Литература, посвященная исследованию локального распределения коэффициентов теплоотдачи по поверхности ребер, немногочисленна. Причину подобного обстоятельства легко понять, если принять во внимание значительные трудности, возникающие при измерении локальных тепловых потоков и температур поверхности исследуемых объектов. Учитывая вышеизложенное, обратимся к материалам ряда работ для анализа характера локального изменения коэффициентов теплоотдачи по поверхности ребер.

Основываясь на принципах подобия процессов тепло и массообмена Крюкельс и Коттке [2] с помощью фотометрического метода [1] на цилиндрах с квадратными и круглыми ребрами, установили, что наиболее активными являлись лобовая ($\varphi = 0^\circ$) и кормовая ($\varphi = 180^\circ$) части ребра, а зона экватора ($\varphi = 90^\circ$) работала неудовлетворительно.

В некоторой части, касательно активности лобовой зоны ребра, указанные результаты нашли отражение в работах Сабоя и Спэрроу [3, 5]. Авторы с помощью метода сублимации нафталина на моделях однорядного и трехрядного плоскооребренного теплообменника определили, что лобовая зона ребра имела высокие значения коэффициентов переноса. При этом относительно низкие значения коэффициентов переноса наблюдались для

части ребра, лежащей ниже по потоку за экватором. Особенно низкие коэффициенты наблюдались в области за трубой, в теневой части ребра.

Таким образом, результаты работ [2] и [3, 5] явно противоречивы в оценке массообмена кормовой и экваториальной зон ребра. Предпринятая попытка ликвидации вредного влияния следа за трубой, путем смещения трубы в кормовую зону [4], увеличила суммарный массообмен на 5%. Тем самым подтвердив выводы работ [3, 5].

Ряд авторов отдавали предпочтение прямому методу определения локальных коэффициентов теплоотдачи [6-10]. В работе [9] определено, что зона активного теплообмена располагалась на передней части ребра до экватора ($\varphi = 60 - 90^\circ$), а в кормовой зоне коэффициенты теплоотдачи были низки. Отмеченные результаты нашли дальнейшее подтверждение в работе [8], где усредненный по высоте ребра максимальный коэффициент теплоотдачи наблюдался в экваториальной зоне ребра ($\varphi = 90^\circ$).

Аналогичные выводы приведены в работе [11], где авторами установлено, что поверхность ребер, расположенная в корме, в области умеренных значений чисел Рейнольдса, фактически являлась «балластной». Этот вывод удовлетворительно согласуется с данными работ [3, 5, 7, 8, 9] и подтвержден специальными опытами по сокращению кормовой зоны ребер в работах [4, 10, 12].

В данной работе, используя физические модели ребристых элементов, проведена оценка факторов влияющих на локальные изменения температурных напоров между температурами охлаждающего потока воздуха в межреберной полости и поверхности ребер, и на смещение трубы по поверхности ребра на его тепловые показатели.

II. УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В сменных рабочих участках разомкнутой аэродинамической трубы устанавливались исследуемые одиночные ребра, либо наборной элемент ребристой трубы. Геометрические размеры оребренных элементов выбирались из условия создания поверхности с высокой степенью развития. Характеристики исследуемой поверхности приведены в таблице 1.

Конструкция наборного элемента ребристой трубы представлена на рисунке 1.

Таблица 1 – Характеристики исследуемой поверхности

Диаметр ребра $D_p, \text{м}$	Толщина ребра $\delta_p, \text{м}$	Шаг ребер $u_p, \text{м}$	Диаметр трубы $d_{тр}, \text{м}$	Площадь поверхности ребра- $F_p, \text{м}^2$
0,105	0,002	0,006	0,035	0,016

Во внутреннем сечении канала 115x22 мм, между центральными и боковыми цилиндрическими деревянными дисковыми вставками, имитирующими элементы трубы не участвующие в теплообмене, установлены исследуемое центральное ребро и боковые охранные ребра. Подвод электропитания к трем плоским константовым нагревателям ребер, с автономными системами регулирования и контроля мощности, осуществлялся по проходному центральному каналу. После установки электровыводов канал изолировался. На одном участке центрального ребра от вершины до его основания было установлено по шесть термопар на поверхности круглого ребра и на воздухе в межреберной полости. Определение температурного поля ребра осуществлялось при различной ориентации контролируемого (термопарного) участка, относительно набегающего потока воздуха за счет дискретного поворота ребра вокруг своей оси через каждые $\varphi = 15^\circ$. Контроль ориентации обмеряемого участка по потоку осуществлялся с помощью координатника, закрепленного к концевой бобышке.

Тепловой поток, отводимый ребром, определялся по величине электрической мощности, затрачиваемой на нагрев плоских кольцевых нагревателей. Измерение температуры воздуха в межреберной полости проводилось с целью определения температурного напора между поверхностью ребра и охлаждающим потоком воздуха в местах ориентации контролируемого термопарного

участка ребра относительно направления потока воздуха от 0 до 180° через каждые 30° . Полученные опытные значения температур поверхности ребра наносились на масштабное изображение ребра и прорисовывались изотермические зоны в пределах точности измерения термопар $0,1^\circ\text{C}$.

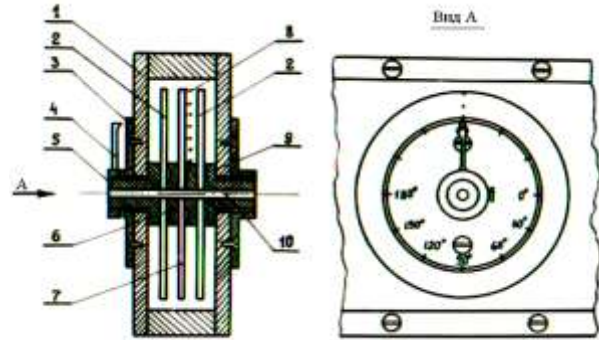


Рисунок 1 – Схема рабочего участка лабораторной установки

1 – канал; 2 – охранные ребра; 3 – координатная планка; 4 – координатник; 5 – концевые бобышки; 6 – имитаторы трубы; 7 – исследуемое ребро; 8 – термопары; 9 – кольцевые нагреватели; 10 – канал для подвода электропитания.

Средняя температура ребра определялась по уравнению

$$t_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^n t_k \cdot f_k}{\sum_{k=1}^n f_k} \quad (1)$$

где f_k – площадь изотермической зоны; t_k – температура изотермической зоны.

Массовый расход продуваемого воздуха определялся с помощью массметра. Принцип действия датчика основан на измерении разности температур, проходящего через него воздуха, которому сообщалось определенное количество тепла. Для точного измерения подогрева газа применялась дифференциальная гипертермопара, составленная из 10 последовательно соединенных термопар. Измерение термо-э.д.с. производилось потенциометром. Нагревательная нить датчика изготавливалась из константана – материала, не изменяющего свое сопротивление при изменении его температуры. Подводимая к нагревательной нити электрическая мощность определялась с помощью лабораторных приборов – амперметра и вольтметра. Замеры расхода воздуха с помощью массметра контролировались дублирующим измерением скорости воздуха с помощью пневмометрической трубки на участке стабилизации потока в аэродинамической трубе. Расхождения результатов определения скорости воздуха с помощью отмеченных методов измерения не превысили 10%.

Для снижения радиационных потерь исследуемого центрального ребра в конструкции набор-

ного элемента ребристой трубы были предусмотрены обогреваемые боковые охранные ребра.

На рисунке 2 приведены термограммы ребер изготовленных из различных материалов, построенные по показаниям термопар при приблизительно равных плотностях теплового потока q , отнесенных к наружной поверхности ребер. При проведении опытов температуры торца ребра не учитывались.

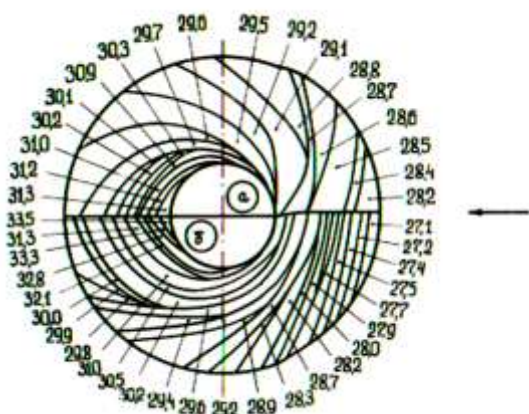


Рисунок 2 – Распределение температур по поверхности ребер при температуре воздуха на входе $t_{вх} = 23^{\circ}\text{C}$ и скорости в живом сечении $\omega = 9,1 \text{ м/с}$:

- а) – алюминиевое ребро $q = 491 \text{ Вт/м}^2$;
б) – стальное ребро $q = 478 \text{ Вт/м}^2$

Как видно из рисунка 2 существенное влияние на температурную неравномерность оказывает материал ребра. При обобщении результатов исследования температурных полей на поверхности алюминиевых и стальных ребер при различных значениях скорости воздуха $\omega = 6,1 - 19,1 \text{ м/с}$, установлено, что при выбранном числе термопар, усреднение температуры поверхности ребра по уравнению (1) хорошо согласуется с их среднеарифметическими значениями. При этом температурного снижения ребра по высоте зависел от угла ориентации контрольного участка по потоку воздуха (рисунк 3).

Обычно при определении локальных значений коэффициентов теплоотдачи по высоте ребра используют температурный напор, определяемый по уравнению:

$$\Delta t_h = t_{h, \text{ср.}} - t_{\text{ср. в.}} \quad (2)$$

где $t_{h, \text{ср.}}$ – среднее значение температуры поверхности по высоте ребра, $t_{\text{ср. в.}}$ – среднее значение температуры воздуха между температурами на входе и выходе рабочего участка.

Однако использование средней температуры воздуха ($t_{\text{ср. в.}}$) при определении локального значения температурного напора приводит к неверной оценке характера его изменения по потоку. Как видно из рисунка 4, действительный температурный напор, определенный как разность между локальными значениями температур поверхности и

воздуха в межреберной полости и усредненный по высоте ребра Δt_h , ниже температурного напора, определенного расчетным путем по уравнению 2.

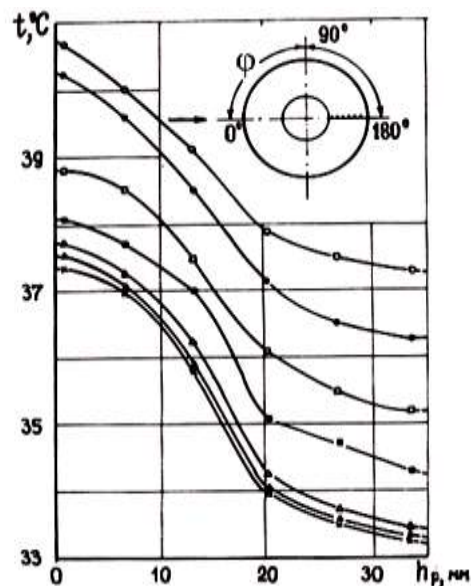


Рисунок 3 – Изменение температуры ребра по его высоте для различных углов ориентации по потоку воздуха при $\omega = 8,5 \text{ м/с}$ и $q = 688 \text{ Вт/м}^2$:

- х - $\varphi = 0^{\circ}$; \blacktriangle - $\varphi = 30^{\circ}$; \triangle - $\varphi = 60^{\circ}$; \blacksquare - $\varphi = 90^{\circ}$;
 \square - $\varphi = 120^{\circ}$; \bullet - $\varphi = 150^{\circ}$; \circ - $\varphi = 180^{\circ}$

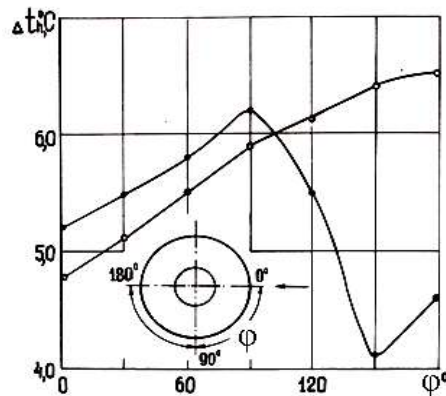


Рисунок 4 – Изменение температурных напоров по окружности круглого ребра при различных значениях определяющей температуры охлаждающего потока воздуха:

- \bullet – локальная температура охлаждающего потока;
 \circ – средняя температура охлаждающего потока.

Важно отметить, что в диапазоне скоростей воздуха в «живом» сечении рабочего участка $6,1 \dots 19,1 \text{ м/с}$ характер изменения действительного температурного напора на участке $\varphi = 0 - 90^{\circ}$ практически совпадает с расчетным (2) температурным напором. Основная доля отклонений приходится на область $\varphi = 120 - 180^{\circ}$. При этом максимальное значение действительного температурного напора для всех режимов наблюдалось в зоне $\varphi = 0 - 90^{\circ}$.

Сопоставление тепловых характеристик одиночных ребристых элементов различных форм проведено по условным коэффициентам теплопередачи. Значения, которых получены в съёмном канале (см. рисунок 5) аэродинамической трубы.

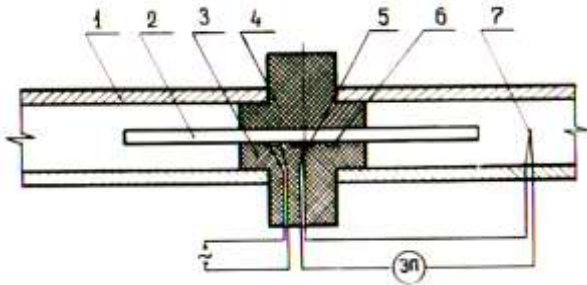


Рисунок 5 - Схема рабочего участка:

1 – канал экспериментального участка; 2 – исследуемое ребро; 3, 4 – элементы трубы; 5 – медная подложка; 6 – плоский константановый нагреватель тороидальной формы; 7 – дифференциальная термопара

Исследуемое ребро устанавливалось в канале с внутренним сечением 115x10 мм между деревянными бобышками, имитирующими элементы трубы, не участвующими в теплообмене. Подвод питания к константановому нагревателю осуществлялся через бобышку. Температурный напор ($\Delta t_{\text{усл}}$), между температурой поверхности в центре ребра и температурой воздуха на входе в рабочий участок, определялся с помощью дифференциальной термопары, конец которой на поверхности ребра для увеличения площади контакта был закреплён на медной подложке.

Значения условных коэффициентов теплопередачи при постоянном тепловом потоке $Q = \text{const}$ определяли по уравнению:

$$k_{\text{усл}} = Q / (F_p \cdot \Delta t_{\text{усл}}) \quad (3)$$

где Q – тепловой поток, отводимый ребром, Вт; $F_p = 0.016 \text{ м}^2$ – площадь наружной поверхности ребра, м^2 .

Исследуемые формы одиночных калориметрических ребер при различных вариантах их ориентации по потоку воздуха приведены на рисунке 6.

При сопоставлении всех семи типов форм ребер соблюдались условия равенства скоростных и расходных характеристик охлаждающего потока воздуха и площадей поверхностей теплообмена ребер. Сопоставление квадратного (калориметр №1) и круглого (калориметр №2) ребер в пределах погрешности эксперимента подтвердило выводы многих авторов об их тепловой равнозначности. Аналогичные результаты получены (рисунок 7) и для остальных форм ребер (калориметры №3-7).

На калориметрах №5 и №7 проведено оценка смещения трубы по оси ребра, направленной по потоку воздуха, с целью определения влияния

фактора уменьшения лобовой или кормовой зон ребер на интенсивность их теплообмена (рисунок 8).

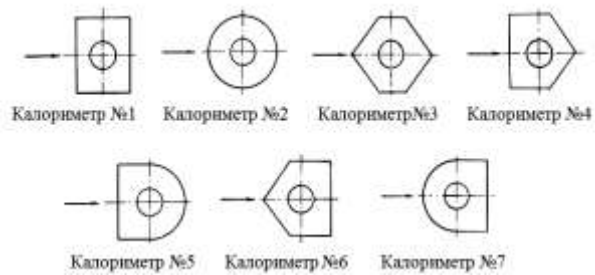


Рисунок 6 – Исследуемые формы ребер №1-7.

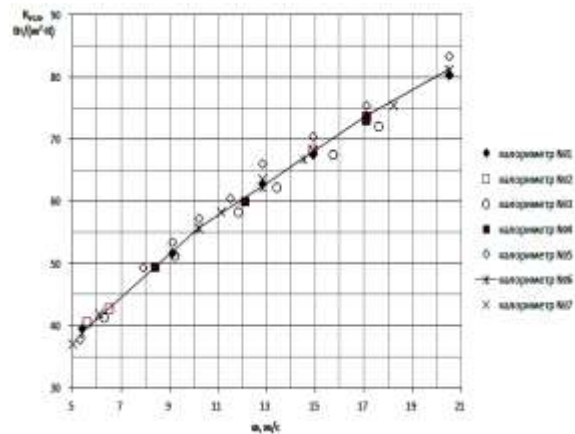


Рисунок 7 – Зависимость условных коэффициентов теплопередачи от скорости охлаждающего потока воздуха для различных форм ребристых элементов

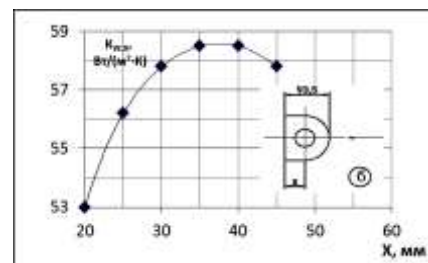
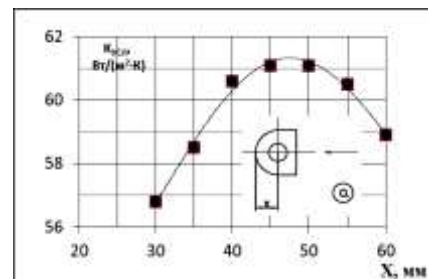


Рисунок 8 – Изменение условных коэффициентов теплопередачи при смещении геометрического центра трубы относительно задней кромки ребра: а) калориметр №5; б) калориметр №7.

Опыт показал, что смещение трубы калориметра №5 из его лобовой зоны ($X=60 \text{ мм}$) в корму приводит к незначительному повышению значе-

ния условного коэффициента теплопередачи примерно до геометрического центра ребра по потоку воздуха ($X=47,5$ мм). Дальнейшее смещение трубы в кормовую зону до ($X=30$ мм) вызывает снижение условного коэффициента теплопередачи ($k_{\text{усл}}$) относительно максимума на 6,6%.

Для калориметра №7 смещение трубы в кормовую зону вначале (на участке $X = 45-37,5$ мм) приводит к росту, а при дальнейшем смещении до ($X = 20$ мм) к падению значения ($K_{\text{усл}}$) относительно максимума на 9,4%.

Таким образом, для калориметра №7, смещение трубы в кормовую зону ребра на 9,25 мм от геометрического центра ребра по потоку воздуха приводит к незначительному на 1,4% увеличению среднего значения $k_{\text{усл}}$.

Для калориметра №5 смещения трубы в лобовую зону ребра на 0,75 мм от его геометрического центра приводит к максимальному значению $k_{\text{усл}}$ ($X= 47,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$).

III. ВЫВОДЫ

В работе предложен простой и надежный метод для качественного сравнения различных форм ребер по значениям условных коэффициентов теплопередачи. На основании предложенного метода установлено, что смещение труб в кормовую зону ребер не технологично и не приводит к улучшению условий теплообмена вследствие изменения скорости воздуха в «живом» сечении канала. Тип формы кромки ребра на входе воздуха в рабочий канал не имеет существенного значения, при равных скоростях воздуха в «живом» сечении канала, о чем свидетельствуют результаты, представленные на рисунке 7.

Использование среднего значения температуры между значениями входа и выхода воздуха при определении температурного напора неправомерно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kruckels W.** Photometrische Messung des ortlichen Stoffubergangas an guerangestromten Kreiszyllinders. Chemic Ingenieur Technik, 1969, 41, Jahrgang, Okt. Pp. 1068-1076.
2. **Kruckels W. and Kottke V.** Untersuchunguber die Vertciung des Wärmeubergangs an Rippenund Rip-

penrohr Modellen - Chemic Ingenieur Technik, 1970, 42, Jahrgang, Mazz, pp. 355-362.

3. **Сабойя Ф.Э.М., Спэрроу Э.М** Локальные и средние значения коэффициентов переноса для однорядных трубчатых теплообменников с плоскими ребрами. // Труды американского общества инженеров механиков, Теплопередача, М.: Мир, 1974, №3, с. 1-10.

4. **Сабойя Ф.Э.М., Спэрроу Э.М** Влияние смещения труб на коэффициенты массообмена трубчатого теплообменника с плоскими ребрами // Труды американского общества инженеров механиков, Теплопередача, М.: Мир, 1974, №3, с. 174-176.

5. **Сабойя Ф.Э.М., Спэрроу Э.М** Экспериментальное определение характеристик в трехрядном трубном теплообменнике с полным оребрением // Труды американского общества инженеров механиков, Теплопередача, М.: Мир, 1976, №3, с. 193-195.

6. **Легкий В.М., Павленко В.П., Макаров А.С., Жолудов Я.С.** Исследование местной теплоотдачи трубы с кольцевыми ребрами в поперечном потоке воздуха. / Теплофизика и теплотехника. Киев: Наукова думка, 1973, вып. 23, с. 86-90.

7. **Мигай В.К., Быстров П.Г., Моргун А.В.** Исследование локальной теплоотдачи конвективных мембранных поверхностей нагрева котлов. – Теплоэнергетика, 1982, №10, с. 43-46.

8. **Скринька А.Ю., Жукаускас А.А., Стасюлявичус Ю.К.** Экспериментальное исследование локальных коэффициентов теплоотдачи спирально оребренных труб. Труды АН Литовской ССР, серия Б, 1964, №4(39), с. 213-218.

9. **Lymer A. and Ridal B.F.** Finned tubes in cross flow of gas. – J. Brit. Nucl. Cons. 1961, October, pp. 307-313.

10. **Кунтыш В.Б., Иохведов Ф.М.** Исследование теплообмена и аэродинамического сопротивления труб с круглым поперечным эксцентричным ребром // Изв. Высших учебных заведений, Приборостроение, 1980, №2, с. 91-95.

11. **Кунтыш В.Б., Иохведов Ф.М.** Исследование теплоотдачи и аэродинамического сопротивления поперечно обтекаемых цилиндров с различной формой спирального оребрения // Изв. Высших учебных заведений, Приборостроение, 1975, №2, с. 118-123

A.E. Lagytin, P.F. Stoianov

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatnaja str., Odessa, 65039, Ukraine

THERMAL EFFICIENCY ANALYSIS OF CROSS-FINNED TUBES

Finned heat exchangers are the basic type of heat exchanger employed in many industrial applications such as refrigeration, air conditioning and other thermal processes. This paper presents experimental research of air-side heat transfer of finned surfaces. Seven types of finned surfaces are employed in this study. Investigation describes temperature fields and temperature cooling air-flow changing in the inter-fin duct without taking into account tube section. Temperature difference in-between local real air temperature data and fin surfaces are determined. The air-side heat transfer coefficients of finned tubes were evaluated at various air flow rate. Experimental setup was designed to simulate a single passage in a fin-tube heat exchanger. The heat transfer improvement of finned surfaces is a problem which includes several factors. Among the main factors are the fin form and its material. A series of tests presented in this paper reveal visual and quantitative details of local fin-surface temperature distributions for steel and aluminum fins. The air-side thermal performance data of finned surfaces were analyzed using conditional coefficient of heat transfer. Tube displacement in regard to fin on its thermal characteristics is evaluated. Experimental results have also shown that edge type of the inter-fin duct is not influenced on heat exchange performance. The results of research indicate that conditional coefficient of heat transfer can be used for performance comparison of finned heat exchange surfaces. This method is very useful for simple heat transfer estimation of finned surfaces for a wide range of practical applications.

Keywords: Experiment – Fin – Tube – Temperature field – Heat transfer.

REFERENCES

1. **Kruckels, W.** 1969. Photometrische Messung des örtlichen Stoffübergangs an gerangestromten Kreiszyllinders. *Chemic Ingenieur Technik*, 41, Jahrgang, Okt, 1068–1076.
2. **Kruckels, W., Kottke, V.** 1970. Untersuchung über die Verteilung des Wärmeübergangs an Rippen- und Rippenrohr Modellen – *Chemic Ingenieur Technik*, 42, Jahrgang, März, 355–362.
3. **Saboya, F.E.M., Sparrow, E.M.** 1974. Trydy amerikanskogo obshchestva inzhenerov, mexanikov. *Teploperedacha*, Moskow, Mir, No. 3, 1–10.
4. **Saboya, F.E.M., Sparrow, E.M.** 1974. Trydy amerikanskogo obshchestva inzhenerov, mexanikov. *Teploperedacha*, Moskow, Mir, No. 3, 174–176.
5. **Saboya, F.E.M., Sparrow, E.M.** 1976. Trydy amerikanskogo obshchestva inzhenerov, mexanikov, *Teploperedacha*, M., Mir, No. 3, 193–195.
6. **Legkiy, V.M., Pavlenkov, V.M., Makarov, A.S., Geludov, Y.S.** 1973. Kiev: Naukova dumka, *Teplofizika i teplotekhnika*, 23, 86–90. (in Russian)
7. **Migay, V.K., Bustrov, P.G., Morgyn, A.V.** 1982. *Teploenergetika*, No. 10, 43–46. (in Russian)
8. **Skrinva, A.Y., Zhukauskas, A.A., Stasyulyavichus, Y.K.** 1964. Trydy AN Litovskoy SSR, seriya B, No. 4 (39), 213–218.
9. **Lymer, A., Ridal, B.F.** 1961. Finned tubes in cross flow of gas. – *J. Brit. Nucl. Cons.* 1961, October, 307–313.
10. **Kyntush, V.B., Ioxvedov, F.M.** 1980. Izv. Vysshikh uchebnykh zavedeniy, *Priborostroenie*, No. 2, 91–95. (in Russian)
11. **Kyntush, V.B., Ioxvedov, F.M.** 1975. Izv. Vysshikh uchebnykh zavedeniy, *Priborostroenie*, No. 2, 118–123. (in Russian)

Отримана в редакції 29.10.2014, прийнята до друку 17.11.2014